

# Sur les traces de la matière dans le cosmos

Université de Tous Les Savoirs (UTLS)  
Paris, 19 juin 2004

Réza ANSARI  
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, IN2P3-CNRS et Université de Paris-Sud 11  
Bâtiment 200, BP 34, 91898 Orsay Cedex 05, France

## 1 Introduction

La cosmologie nous fournit une image relativement précise et détaillée de l'origine et de l'histoire de notre univers. Elle est aujourd'hui une discipline scientifique à la croisée de la physique des interactions fondamentales, de l'astronomie et de l'astrophysique. La compréhension de la structure intime de la matière d'une part, et des mécanismes responsables de l'évolution de l'univers primordial d'autre part, sont des domaines qui se nourrissent mutuellement. Ce lien fort explique la présence de cet article dans cette série consacrée essentiellement aux particules élémentaires.

Nous décrirons en particulier quelques-unes des méthodes utilisées pour rechercher les différentes formes de matière présentes dans l'univers et d'en quantifier l'effet sur son évolution. Un survol du modèle standard cosmologique est présenté dans la première partie de l'article (section 2). Nous nous intéresserons ensuite à notre Galaxie, pour y découvrir la matière noire du halo, ainsi que le trou noir qui se trouverait en son centre (section 3). La section 4 est consacrée à la recherche de l'énergie noire grâce aux supernovae lointaines. Enfin, la dernière partie de l'article présente une brève introduction à la physique du fond diffus cosmologique et la détermination de la densité des différentes formes de matière et d'énergie par la mesure des anisotropies du fond diffus cosmologique.

## 2 Les fondements du modèle cosmologique

La théorie de la relativité générale et le modèle standard des particules et des interactions en physique des particules constituent les deux socles sur lesquels repose le modèle cosmologique standard, appelé aussi modèle du Big Bang. Ce modèle dont les prédictions sont confirmées par de nombreuses observations, est communément admis par les chercheurs du domaine. Durant les dix ou quinze dernières années, ce modèle et notre compréhension de l'univers ont été affinés grâce à des observations de plus en plus précises.

### □ Particules et interactions

Le *modèle standard* des particules et de leurs interactions est présenté brièvement ici. Celui-ci est souvent noté  $SU(2) \otimes U(1) \otimes SU(3)$  par référence aux groupes de symétrie de l'interaction électro-faible  $SU(2) \otimes U(1)$  et de l'interaction forte  $SU(3)$ .

Dans le cadre du modèle standard, la matière est constituée de particules de spin 1/2, appelées *fermions*. L'interaction entre ces fermions est portée par des particules de spin entier, qui sont les médiateurs des forces. On distingue deux types de fermions, les *quarks* et les *leptons*.

- Les quarks sont les briques de base qui forment la matière hadronique, c’est-à-dire sensible aux interactions fortes. En particulier, les protons et les neutrons qui forment le noyau atomique sont formés de quarks.
- Les leptons regroupent en trois familles des particules dont les propriétés sont proches de celles des électrons et des neutrinos. Dans chaque famille, les leptons sont sensiblement plus légers que les quarks.

L’ensemble des forces est décrit en faisant appel à quatre interactions fondamentales dans le modèle standard :

- L’interaction forte, appelée aussi la chromodynamique quantique (QCD) est responsable de la cohésion du noyau atomique et se trouve à l’origine de l’énergie nucléaire. Seuls les quarks sont sensibles à cette interaction, portée par les gluons.
- L’interaction électromagnétique est responsable de la presque totalité des propriétés physiques et chimiques de la matière. C’est le photon, quanta de lumière et du rayonnement électromagnétique qui est le médiateur de cette interaction.
- La radioactivité beta ne peut s’interpréter qu’en faisant appel à une nouvelle force, la force faible, moins intense que la force électromagnétique. Les forces faible et électromagnétique sont décrites par une théorie unifiée dans le cadre du modèle standard.
- La gravitation qui agit sur toutes les formes de matière. Nous ne disposons pas encore d’une théorie quantique de la gravitation. Il faut donc faire appel à la théorie de la relativité générale pour compléter la description des interactions.

Enfin, il faut noter qu’afin de palier certaines insuffisances du modèle standard  $SU(2) \otimes U(1) \otimes SU(3)$ , d’autres modèles théoriques ont été élaborés. Les théories dites *supersymétriques* prédisent l’existence de nouvelles particules dont certaines pourraient former la matière noire à l’échelle de l’univers. Le mot WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) désigne de manière générique ces particules. Le lecteur intéressé pourra consulter les autres articles de cet ouvrage pour une discussion plus approfondie des modèles théoriques en physique des particules.

Parmi les différentes formes de matière et d’énergie, il y a celles qui sont présentes de manière certaine dans l’univers, et celles pour lesquelles nous avons des indications théoriques ou observationnelles. Dans la première catégorie se trouve la matière ordinaire, appelée parfois la matière *baryonique*. Cette dénomination provient de la classification des neutrons et des protons, constituants du noyau atomique qui sont des baryons parmi les hadrons. La matière ordinaire se présente sous différentes formes dans l’univers, depuis des formes diffuses comme des gaz atomiques ou moléculaires et des plasmas, jusqu’aux objets célestes que sont les étoiles et les planètes en passant par des agrégats et la poussière. Les photons constituent une autre composante essentielle de l’univers. De même, les neutrinos, qui sont des particules extrêmement discrètes, jouent un rôle important dans l’évolution de l’univers et des étoiles.

Quantifier la contribution relative de ces différentes formes de matière et d’énergie est essentiel pour une bonne compréhension de l’histoire de l’univers. Mais comme nous allons le montrer dans la suite de cet article, d’autres formes de matière et d’énergie semblent influencer l’évolution de l’univers. Clarifier la nature de celles-ci constitue le défi majeur de la cosmologie des prochaines années.

## □ La relativité générale

Les forces gravitationnelles sont beaucoup moins intenses que les forces électromagnétiques ou les forces nucléaires ; elles sont toujours attractives et dominent l'évolution des structures à grande échelle. C'est en effet la gravitation qui est responsable du mouvement des planètes, du système solaire dans la Galaxie et des galaxies au sein des amas. Naturellement, c'est encore la gravitation qui domine la dynamique de l'univers dans son ensemble.

La relativité générale est une théorie qui décrit l'interaction gravitationnelle comme une déformation de l'espace-temps à travers les équations d'Einstein. Celles-ci relient en particulier la courbure de l'espace-temps à la densité de matière et d'énergie. Ces équations admettent des solutions avec un espace-temps en expansion ou en contraction pour une distribution homogène et isotrope de matière. Einstein considérait initialement que ces solutions n'étaient pas physiquement acceptables et c'est en cherchant une solution statique pour la structure de l'espace-temps qu'il introduisit le terme connu sous le nom de **constante cosmologique** ( $\Lambda$ ) dans les équations de la relativité générale.

Pour construire le modèle cosmologique, il faut en outre faire appel au principe cosmologique qui suppose que l'univers est homogène et isotrope à grande échelle pour construire le modèle du Big Bang. La métrique de Friedmann-Robertson-Walker (FRW) décrit alors la structure de l'espace-temps à grande échelle en fonction du paramètre d'échelle  $R(t)$  qui fixe l'échelle physique des distances, notamment des distances entre galaxies, à un instant donné. La dynamique de l'univers est alors fixée par les équations d'Einstein, associées à l'équation de Friedmann qui relie le taux d'expansion  $H(t) = \frac{da/dt}{a}$  à la densité totale de l'énergie, sous quelque forme que ce soit.  $a(t) = R(t)/R(0)$  est un terme sans dimension, appelé facteur d'échelle et correspond au rapport du facteur d'échelle à un instant  $t$  à sa valeur actuelle.

L'observation de l'expansion de l'univers, l'accord entre les prédictions de la nucléosynthèse primordiale et l'abondance mesurée des éléments légers et les mesures du fond diffus cosmologique sont les trois piliers observationnels du Big Bang. Pour une présentation détaillée du modèle cosmologique, on peut consulter par exemple l'ouvrage cité en [1].

## □ L'expansion de l'univers

Dans un univers en expansion, les galaxies sont soumises à la dynamique gravitationnelle globale de l'univers et s'éloignent les unes des autres. La densité de la matière décroît au fur et à mesure que l'expansion progresse et, à l'inverse, si on remonte dans le temps, cette densité croît jusqu'à dépasser les valeurs caractérisant la matière nucléaire. C'est G. Lemaître, astrophysicien et mathématicien belge, qui avait remarqué le premier cette possibilité et avait envisagé, dès 1927, le commencement de l'univers à partir de ce qu'il avait appelé l'atome primitif. Mais ce n'est que lorsque l'astronome américain Edwin Powell Hubble publia l'observation de la récession des galaxies en 1929 que ce modèle, dénommé le Big Bang par la suite, sera accepté par les scientifiques. Nous verrons dans la suite (section 4) comment la mesure de l'évolution du taux d'expansion permet de contraindre la densité totale de matière et d'énergie dans l'univers.

## □ L'origine des éléments chimiques

La centaine d'éléments chimiques connus, depuis l'atome d'hydrogène, le plus léger, jusqu'aux atomes lourds, comme celui de l'uranium, sont tous des assemblages de neutrons, de protons et d'électrons. Le noyau atomique et l'énergie nucléaire ont commencé à livrer leurs secrets à partir des années 1920. La compréhension des mécanismes nucléaires a permis, entre autres, de résoudre l'énigme de la source d'énergie du soleil et des étoiles en général. En 1939, Hans Albrecht Bethe, physicien américain d'origine allemande, propose un cycle de réactions nucléaires conduisant à la formation d'hélium par fusion de protons comme source d'énergie des étoiles. On sait aujourd'hui que presque tous les noyaux sont formés dans la fournaise nucléaire au coeur des étoiles, ou lors de l'explosion de supernovae. La nucléosynthèse stellaire rencontre néanmoins quelques difficultés lorsqu'elle est confrontée aux mesures des abondances nucléaires : l'abondance de l'hélium, qui représente près du quart de la masse de matière ordinaire dans l'univers est largement supérieure à la production cumulée de l'hélium dans les étoiles. En revanche, le modèle du Big Bang apporte une solution à ce problème. En effet, dans le cadre de ce modèle, la densité et la température de l'univers croissent lorsque l'on remonte le temps. Dans l'univers âgé de quelques minutes, les conditions sont réunies pour que le cycle de réactions de formation des noyaux légers - le deutérium, l'hélium et le lithium - puisse avoir lieu : c'est la nucléosynthèse primordiale. Le bon accord entre les abondances mesurées des éléments légers et les prédictions de la nucléosynthèse primordiale constitue le deuxième pilier du modèle standard cosmologique.

## □ Une étrange lumière

L'univers jeune était donc formé d'un plasma extrêmement chaud et dense où les photons étaient en équilibre thermique avec les constituants fondamentaux de la matière : les électrons, les quarks, les neutrinos... La température et la densité diminuent avec le temps, soumises à l'expansion de l'espace-temps. Petit à petit, les quarks peuvent s'assembler pour former les protons et les neutrons. Quelques secondes après, les protons et les neutrons forment à leur tour les noyaux légers, l'hélium en particulier. La nucléosynthèse primordiale correspond à la fin d'une première période d'évolution intense de l'univers.

Mais l'expansion continue et l'univers se refroidit donc de plus en plus : la température n'est plus que de 3000 K lorsque l'univers atteint quelques 300000 ans. Les photons ne sont plus assez énergétiques pour dissocier les atomes neutres qui se forment. L'univers devient alors transparent et les photons peuvent se propager librement.

Ces photons nous parviennent au terme d'un voyage de près de quatorze milliards d'années subissant au passage l'effet de l'expansion de l'univers. Émis essentiellement dans le domaine infra-rouge proche ( $\lambda_e \sim 1 \mu m$ ), nous les détectons aujourd'hui sous forme de rayonnement micro-ondes ( $\lambda_r \sim 1 mm$ ).

Ce rayonnement, appelé le fond de rayonnement cosmologique, a été observé pour la première fois en 1964 par Arno Penzias et Robert Wilson. Chercheurs auprès de Bell Labs (Lucent Technologies aujourd'hui), ils tentaient de mesurer les émissions radio de la voie lactée grâce à une antenne géante de télécommunications. Ils identifient alors la présence d'un niveau de bruit plus élevé que prévu qui s'avérera provenir d'un rayonnement extra galactique.

Ce rayonnement de fond cosmologique, dont l'existence avait été suggéré dès 1948 par G. Gamow, R. Alpher et R. Herman, constitue le troisième pilier du modèle de Big bang. Les propriétés de ce rayonnement seront discutées dans la section 5.

### 3 La matière noire dans notre Galaxie

Notre Galaxie, la Voie Lactée est une immense structure autogravitante formée d'étoiles, de gaz et de poussières. Elle comporte quelques dizaines de milliards d'étoiles, de nombreux nuages de gaz composés essentiellement d'hydrogène et d'hélium, et des grains de poussières contenant des éléments plus lourds (oxygène, carbone ...). Toutes ces composantes correspondent à différentes formes de matière ordinaire ou baryonique.

Si on était capable d'observer notre Galaxie de l'extérieur, on la verrait semblable à la nébuleuse M83, dont la photographie prise par le grand télescope VLT de l'ESO est présentée sur la figure 1. Les étoiles, le gaz et la poussière sont concentrés dans un disque peu épais, moins d'un millier d'années-lumière (AL), mais s'étendant sur près de 200000 AL. Les bras, structures riches en étoiles brillantes, semblent s'enrouler autour d'un noyau central, amas très dense d'étoiles.

Le Soleil est une étoile ordinaire située à 25000 AL du centre de la Galaxie. Le système solaire, à l'instar des autres étoiles et nuages de gaz et de poussières, tourne autour du centre Galactique, l'ensemble constituant un système en équilibre gravitationnel.

#### □ Le halo Galactique

Lorsqu'on mesure les vitesses de rotation des étoiles, du gaz et des poussières en fonction de la distance au centre (courbe de rotation) pour notre Galaxie, et pour de nombreuses autres galaxies similaires, on observe un comportement étrange. En effet, comme on peut le voir sur la figure 2, la matière lumineuse est concentrée vers le centre, et l'on s'attend à voir décroître les vitesses de rotation lorsqu'on s'éloigne suffisamment du centre ( $v_{rot} \propto \sqrt{1/R}$ ). Or la courbe de rotation comporte un plateau où la vitesse reste constante. Ce phénomène est interprété comme étant dû à la présence d'un halo de matière sombre qui n'émet, ni n'absorbe la lumière, mais qui interagit gravitationnellement. La masse du halo atteindrait une dizaine de fois la masse de la matière visible (étoiles, gaz, poussière) dans notre galaxie. Le halo sombre pourrait être formé d'une nouvelle forme exotique de matière, celle qu'on regroupe sous la dénomination *WIMPs* par exemple. Plusieurs équipes tentent de mettre en évidence cette forme de matière à l'aide de détecteurs cryogéniques, comme celui d'EDELWEISS<sup>1</sup> installé dans le laboratoire souterrain de Modane.

Mais ce halo sombre pourrait être constitué de matière ordinaire, mais sous une forme presque *invisible*. Plusieurs hypothèses ont été envisagées, comme celle de nuages de gaz moléculaires froids avec une structure fractale, ou celle d'objets compacts n'émettant pas de rayonnement électromagnétique. Les cadavres stellaires, les trous noirs et les naines brunes qui sont des étoiles avortées sont des candidats possibles pour de tels objets compacts. Ils sont regroupés sous le nom MACHO<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Expérience pour Détecter Les WIMPs En Site Souterrain - <http://edelweiss.in2p3.fr>

<sup>2</sup>MACHO : Massive Compact Halo Object



FIG. 1 – Galaxie spirale Messier 83, située à une distance d'environ 15 millions d'AL. Image prise par le télescope VLT de **E**uropean **S**outhern **O**bservatory - © ESO

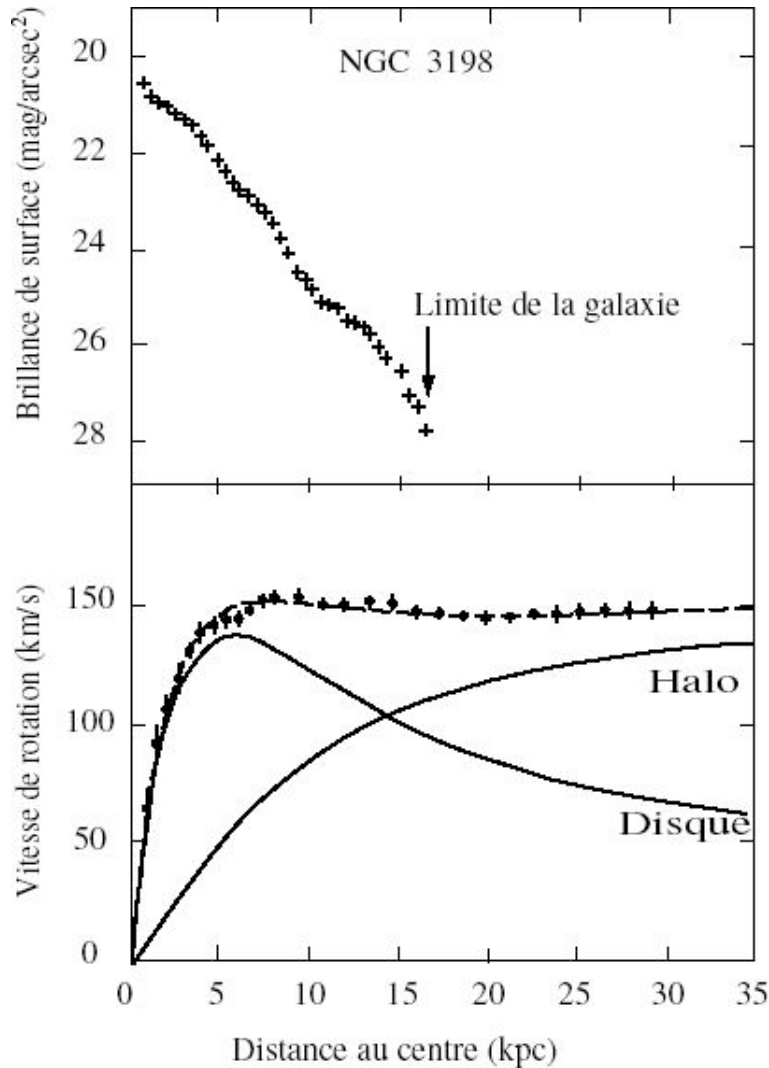


FIG. 2 – Mesure de la courbe de rotation et du profil de luminosité en fonction de la distance au centre pour la galaxie spirale NGC3198

#### □ L'effet de microlentille gravitationnelle

Dans un article publié en 1986, B. Paczynski suggérait que de tels objets pouvaient être détectés à l'aide de l'effet de microlentille gravitationnelle. En effet, comme le prévoit la relativité générale, la lumière d'astres se trouvant en arrière-plan serait défléchi par le champ gravitationnel de ces objets compacts. Il y a alors formation d'images multiples, comme cela est observé pour des effets de lentille gravitationnelle provoqués par des galaxies ou des amas de galaxies.

Dans le cas d'objets compacts de faible masse situés dans le halo, ayant moins d'une masse solaire, il n'est pas possible de résoudre les différentes images. Mais le mouvement de l'objet compact provoque une augmentation transitoire de la luminosité apparente de l'étoile en arrière plan lorsque la ligne de visée est suffisamment proche de l'objet défecteur : c'est l'effet de micro-

lentille gravitationnelle. Bien que très peu probable, le phénomène serait détectable si les objets compacts étaient suffisamment nombreux pour constituer une fraction importante du halo. Il y a moins d'une chance sur un million pour qu'une étoile du fond soit affectée par cet effet.

Afin de rechercher les objets compacts du halo, l'équipe EROS<sup>3</sup> a mis sur pied un ambitieux programme d'observations de plusieurs dizaines de millions d'étoiles de la Galaxie et des nuages de Magellan durant la décennie 1990. Ce projet a été un grand succès : l'effet de microlentille a été observé et est devenu aujourd'hui un nouvel outil d'investigation en astrophysique. D'autres équipes dans le monde ont effectué des observations analogues.

En revanche, le nombre d'événements observés montre que seule une petite fraction du halo, au plus 10% à 15% de sa masse, serait formée d'objets compacts de faible masse. La figure 3 résume les résultats de la collaboration EROS concernant la contribution de MACHOs à la masse totale du halo Galactique, en fonction de la masse des objets déflecteurs [2].

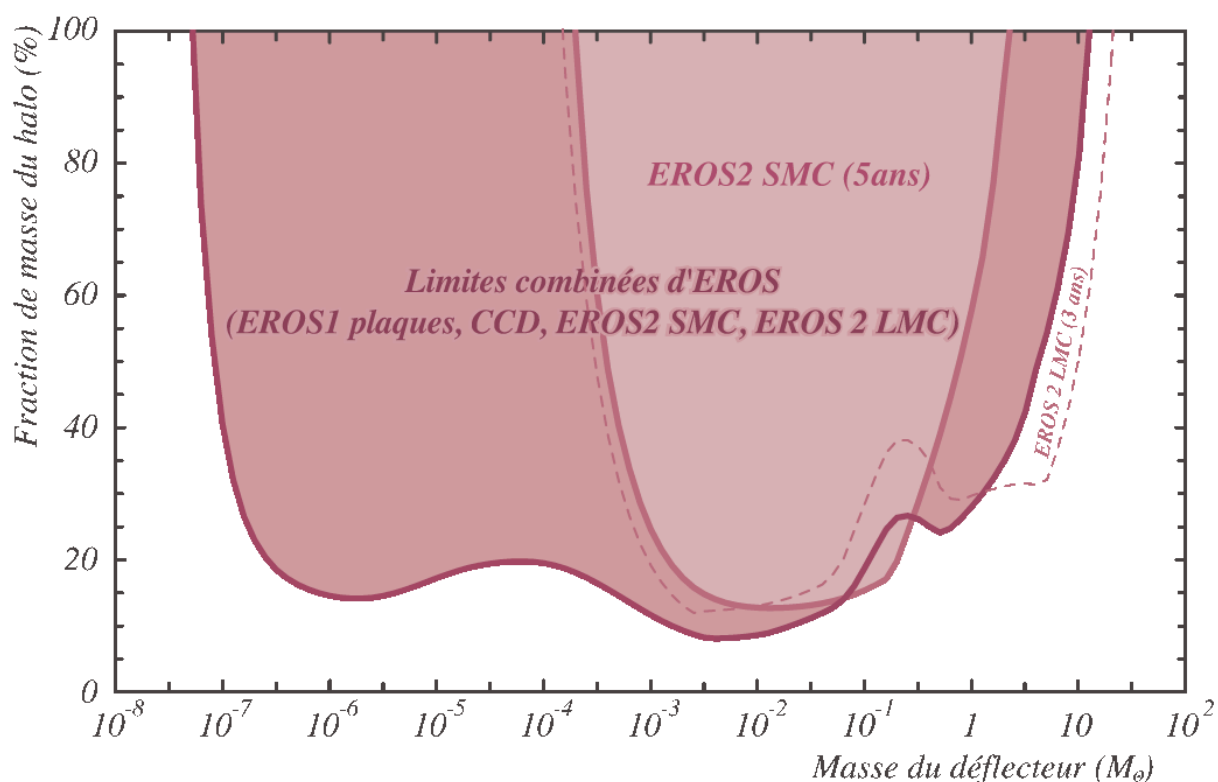


FIG. 3 – Résultat de l'équipe EROS basée sur l'analyse des observations vers les nuages de Magellan (LMC et SMC). Contribution maximale des objets compacts, exprimée sous forme de fraction de la masse totale d'un halo de  $\sim 4 \times 10^{11}$  masses solaires, en fonction de la masse typique des objets déflecteurs [2].

<sup>3</sup>EROS : Expérience de Recherche d'Objets Sombres - <http://eros.in2p3.fr>



#### □ Un trou noir au Centre de la Galaxie ?

La mesure du mouvement apparent des étoiles très près du Centre Galactique a permis de mettre en évidence des vitesses de rotation très élevées, jusqu'à 1500 km/s [3]. Les observations dans le plan Galactique et vers le centre Galactique en particulier sont rendues difficiles par l'absorption de la lumière par l'importante quantité de poussières présentes le long de la ligne de visée. L'utilisation des émissions dans le domaine des ondes radio et des rayons X permet néanmoins de voir à travers ce voile de poussières.

Les observations radio en interférométrie à très longue base (VLBI) montre que c'est un objet compact qui est présent au centre Galactique. L'observation des vitesses de rotation élevées associée à la compacité de la distribution de masse représente une indication forte en faveur de l'existence d'un trou noir de grande masse au centre de la Voie Lactée. Celui-ci aurait une masse d'environ 2,6 millions de fois la masse du soleil. Dans le langage de la relativité générale, un trou noir est une singularité de la structure de l'espace-temps provoquée par un objet massif très dense. En simplifiant, on peut considérer qu'un trou noir est un profond puits de potentiel gravitationnel, pour lequel la vitesse de libération dépasserait celle de la lumière à des distances suffisamment proches. Cette limite de distance définit le domaine que l'on appelle l'horizon du trou noir ( $R_S = GM/c^2$ ).

D'autres observations en radio et en rayons X apportent des preuves complémentaires de l'existence de ce trou noir. En effet, il se forme des disques d'accrétion autour des trous noirs massifs. La matière du disque, proche du trou noir s'échauffe jusqu'à des températures très élevées ( $\sim 10^7 K$ ) par friction lors de sa chute dans le trou noir. On peut observer alors des émissions dans le domaine des rayons X et, parfois, des jets relativistes de matière.

## 4 Les supernovae lointaines et le mystère de l'énergie noire

#### □ Les phares de l'univers

Les supernovae de type Ia (SNIa) sont de véritables feux d'artifice cosmiques, provoqués par l'explosion d'une naine blanche composée essentiellement de carbone et d'oxygène. L'explosion se produit lorsque l'équilibre gravitationnel est rompu suite à l'accrétion de matière par la naine blanche. Lorsque la masse de l'objet s'approche de la limite de Chandrasekhar, la pression du gaz dégénéré d'électrons n'est plus suffisante pour compenser l'attraction gravitationnelle. Cette rupture d'équilibre provoque une augmentation de la température et de la densité, déclenchant l'allumage des réactions de fusion thermonucléaire. Lorsqu'elles atteignent leur luminosité maximale, les supernovae deviennent aussi lumineuses qu'une galaxie entière, brillant comme une dizaine de milliards d'étoiles pendant quelques jours. La figure 4 provient des observations effectuées en 1994 par le télescope spatial Hubble (HST) de l'explosion d'une supernova dans une galaxie lointaine. La supernova, visible en bas à gauche, a une luminosité comparable à sa galaxie hôte.

Du fait de leur extrême brillance, les SNIa sont *visibles* jusqu'à des distances cosmologiques, c'est-à-dire plusieurs milliards d'années-lumière. En outre, leur luminosité intrinsèque au maximum est suffisamment uniforme pour qu'on puisse les considérer comme des *chandelles standard*. Cette uniformité s'explique par la masse de combustible nucléaire disponible, correspondant à la limite de Chandrasekhar à  $1,4 M_{\odot}$ .



FIG. 4 – Image de la supernovae 1994D et de sa galaxie hôte, observée par le télescope spatial Hubble en 1994. © HST/STScI

Les SNIa peuvent donc être utilisées pour mesurer la distance en fonction du décalage vers le rouge  $z$ , jusqu'à des valeurs de  $z$  dépassant l'unité. La mesure de distance, appelée distance de luminosité  $d_L$ , est obtenue en comparant la luminosité apparente de la supernova à sa luminosité intrinsèque. Les propriétés géométriques de l'univers peuvent être déterminées en analysant la courbe  $d_L = f(z)$ .

#### □ Les paramètres cosmologiques

Une dizaine de paramètres environ sont nécessaires pour caractériser notre univers dans le cadre du modèle standard cosmologique. L'évolution de l'univers dépend de la valeur de ces paramètres qui ne peuvent être obtenus qu'à partir des observations.

Parmi ceux-ci, la "constante" de Hubble  $H_0$  et les paramètres de densité ( $\Omega_m, \Omega_\Lambda$ ) tiennent une place à part. Ils déterminent en effet la géométrie de l'univers et la loi d'évolution du facteur d'échelle  $a(t)$  avec le temps cosmologique.

- La "constante" de Hubble  $H_0$  est à la valeur actuelle du taux d'expansion  $H(t) = \frac{da/dt}{a}$ .

- Le décalage vers le rouge  $z(t)$  appelé *redshift* en anglais correspond à la variation relative du facteur d'échelle, entre aujourd'hui et un moment  $t$  dans le passé :  $z(t) = a(t_0)/a(t)$ .  $z$  est souvent mesuré à l'aide du décalage en longueur d'onde de raies atomiques ou moléculaires ( $z = \Delta\lambda/\lambda$ ).
- Pour une valeur particulière de la densité totale de matière et d'énergie, appelée la densité critique  $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$ , la géométrie de l'univers est euclidienne. Les paramètres de densité sont en général exprimés en unité de densité critique et sont notés  $\Omega_x = \frac{\rho_x}{\rho_c}$ .
- $\Omega_m$  est la densité moyenne de matière aujourd'hui, qu'elle soit formée de matière ordinaire ou de particules exotiques massives.
- Si la constante cosmologique  $\Lambda$  était non nulle, elle se manifesterait sous forme d'une force répulsive à grande échelle dans les équations d'évolution de l'univers.  $\Omega_\Lambda$  représente la densité d'énergie équivalente à celle de la constante cosmologique, rapportée à la densité critique. Dans le cadre de la mécanique quantique, l'état du vide peut avoir une énergie non nulle. L'énergie du vide aurait alors un comportement gravitationnel similaire à la constante cosmologique.

La figure 5 montre la variation de la distance de luminosité en fonction du décalage vers le rouge pour différentes valeurs de densité totale de matière  $\Omega_m$  et de densité associée à la constante cosmologique  $\Omega_\Lambda$ .

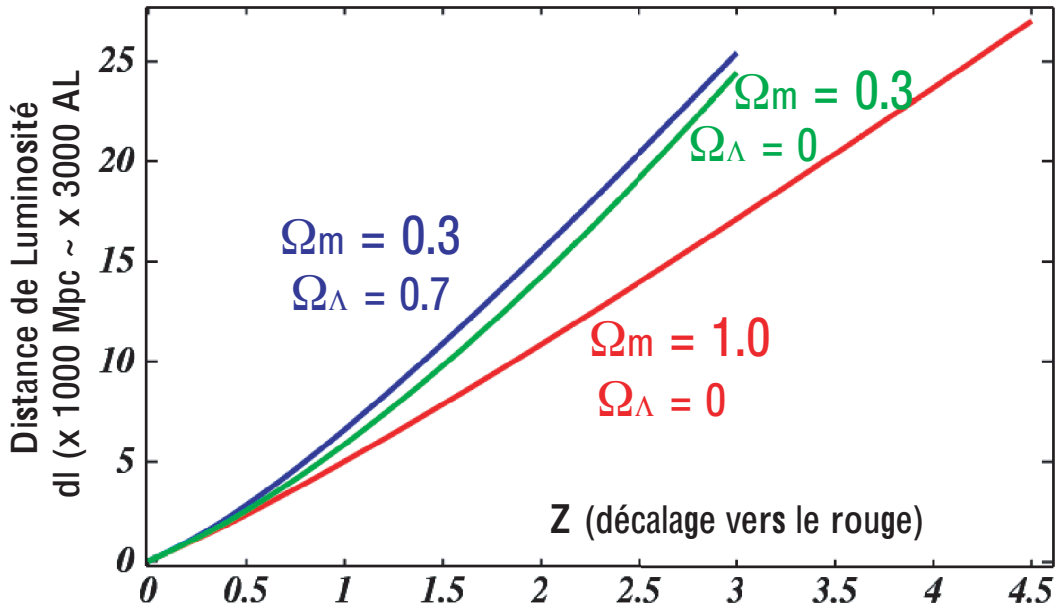


FIG. 5 – Distance de luminosité en fonction du décalage vers le rouge pour trois jeux de paramètres de densité :  $(\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda = 0)$ ,  $(\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0)$ ,  $(\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7)$

Plusieurs programmes de recherche et de mesure de supernovae lointaines ont été mis sur pied dans les dernières années, comme le relevé SNLS<sup>4</sup> auprès du télescope franco-canadien CFHT au Mauna Kea, à Hawaï, pour déterminer la variation de la distance de luminosité avec le décalage vers le rouge.

Les résultats récents publiés par différents groupes dans ce domaine, dont le **SCP** (Supernovae Cosmology Project) et le **High Z** Supernovae Team ont créé la surprise dans le milieu des cosmologistes en fournissant les premières indications en faveur d'une valeur non nulle pour la constante cosmologique.

La figure 6 résume les contraintes obtenues à partir de l'observation des SNIa lointaines dans le plan  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$  [4].

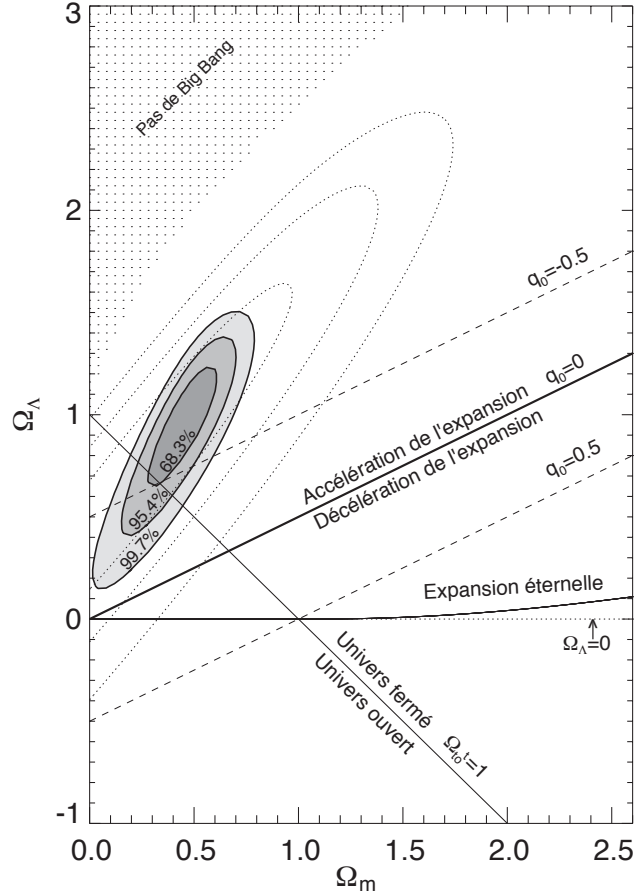


FIG. 6 – Contraintes dans le plan  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$  obtenues à partir des observations des supernovae lointaines [4].

<sup>4</sup>SNLS : SuperNovae Legacy Survey - <http://cfht.hawaii.edu/SNLS/>

## 5 Les anisotropies du fond diffus cosmologique

Nous avons vu dans la section 2 que le fond diffus micro-ondes est un rayonnement thermique, vestige du passé chaud de l'univers, émis à un moment de l'histoire de l'univers caractérisé par un décalage vers le rouge  $z \sim 1100$ . Ce rayonnement est remarquablement isotrope et présente le spectre d'un corps noir à une température de 2,725K, au moins lorsqu'on l'étudie en dehors des sources brillantes du ciel et de la Galaxie en particulier. Ces caractéristiques sont à la base de l'interprétation attribuant une origine cosmologique à ce rayonnement.

Or, l'univers bien qu'homogène et isotrope dans son ensemble, est de plus en plus structuré lorsqu'on l'observe à des échelles de plus en plus fines. De nombreuses galaxies, semblables à la Voie Lactée, formées d'étoiles et de nuages de gaz existent dans l'univers. Ces galaxies sont regroupées en structures de très grande taille, appelées amas, eux-mêmes rassemblés en super amas. Ces structures se seraient formées suite à l'effondrement gravitationnel d'infimes inhomogénéités de densité de matière, présentes dès les premiers instants de l'expansion. Dans le cadre du modèle cosmologique standard, l'origine de ces inhomogénéités de densité est attribuée aux fluctuations quantiques d'un champ qui serait responsable d'une première phase d'expansion accélérée de l'univers, appelée période d'inflation.

On s'attend à retrouver la trace de ces fluctuations de densité dans le rayonnement du fond cosmologique, sous forme d'anisotropies de température, c'est-à-dire de petites variations d'intensité du rayonnement en fonction de la direction d'observation. Après 25 années de tentatives infructueuses, c'est finalement en 1992 que l'instrument DMR (Differential Microwave Radiometers), embarqué à bord du satellite COBE, a pu mesurer ces anisotropies, correspondant à des variations de quelques dizaines de microkelvins ( $\Delta T \sim 10^{-5} K$ ) en fonction de la direction d'observation.

Le satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), lancé par la NASA en juillet 2001, a fourni au début 2003 une cartographie complète du fond micro-ondes et une mesure précise du spectre des anisotropies jusqu'à des échelles angulaires de  $15'$  d'arc.

La figure 7 montre l'évolution de notre connaissance du ciel micro-ondes depuis sa découverte par Penzias et Wilson, et l'apport des satellites COBE<sup>5</sup> et WMAP<sup>6</sup>.

Les anisotropies du fond diffus sont une mine d'informations pour l'étude des modèles cosmologiques. Des variations de température sont visibles à toutes les échelles angulaires sur la carte de température du fond diffus (figure 7). Le spectre angulaire de ces anisotropies ( $C(l)$ ) permet de caractériser statistiquement l'amplitude des variations de température en fonction de l'échelle angulaire. Ce spectre présente une succession de pics et de creux, à des échelles angulaires inférieures au degré, caractéristique des oscillations acoustiques du plasma formé par les protons, les électrons et les photons avant la formation des atomes neutres et du découplage des photons.

L'analyse fine de ce spectre permet entre autres une détermination précise de la presque totalité des paramètres cosmologiques. La figure 8 représente le spectre des anisotropies de température mesuré par WMAP [5].

---

<sup>5</sup>COBE : Cosmic Background Explorer - <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>

<sup>6</sup>WMAP : Wilkinson Microwave Anisotropy Probe - <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>

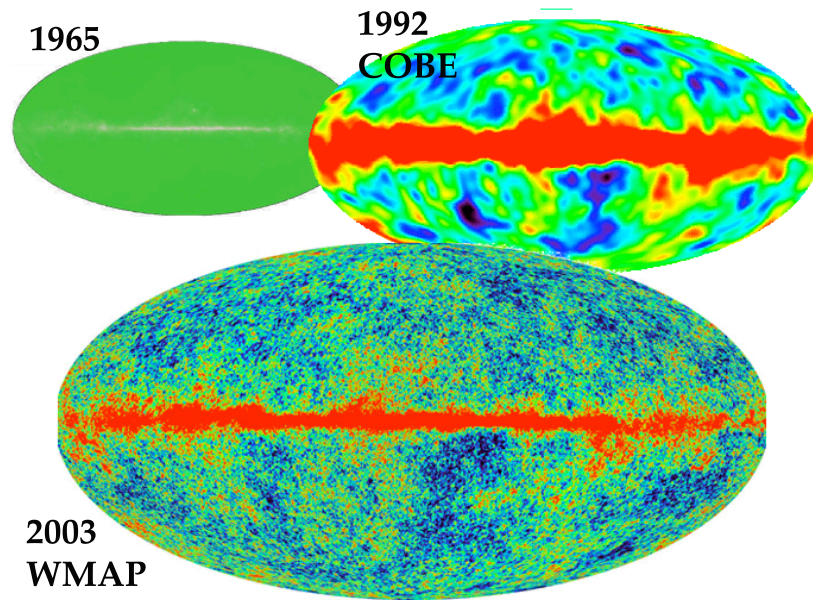


FIG. 7 – Evolution de la connaissance du ciel micro-ondes, depuis sa découverte en 1965, jusqu’aux mesures de WMAP en 2003, en passant par celles du satellite COBE en 1992

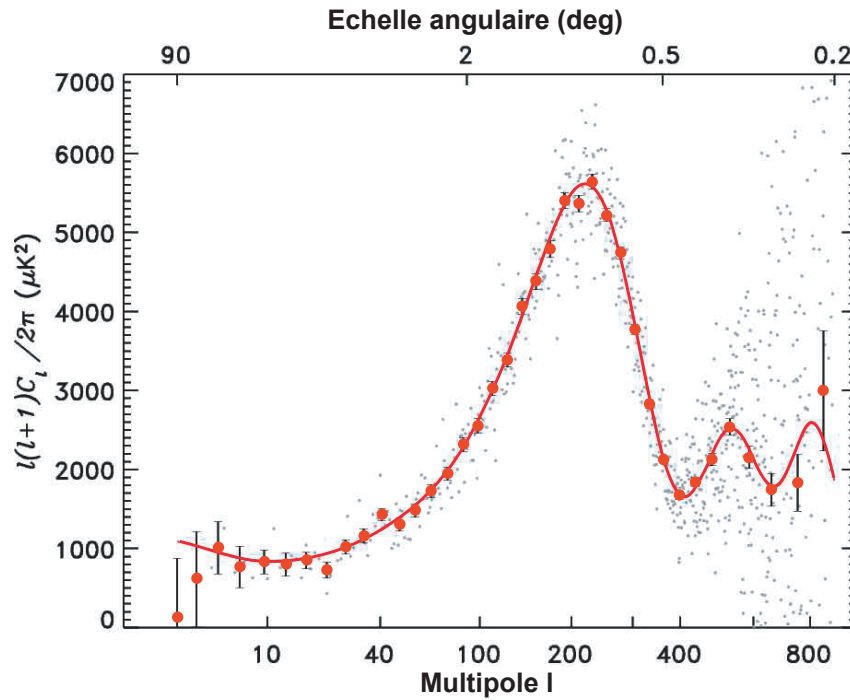


FIG. 8 – Spectre de puissance mesuré par WMAP [5]

Fin 2002, quelques mois avant WMAP, la collaboration Archeops<sup>7</sup>, qui utilisait un instrument bolométrique embarqué à bord d'un ballon stratosphérique, publiait ses résultats obtenus à partir d'une large couverture du ciel, fournissant ainsi les premières mesures homogènes dans le domaine des échelles angulaires intermédiaires, de un à dix degrés. Le spectre des fluctuations mesuré par Archeops est représenté sur la figure 9 [6].

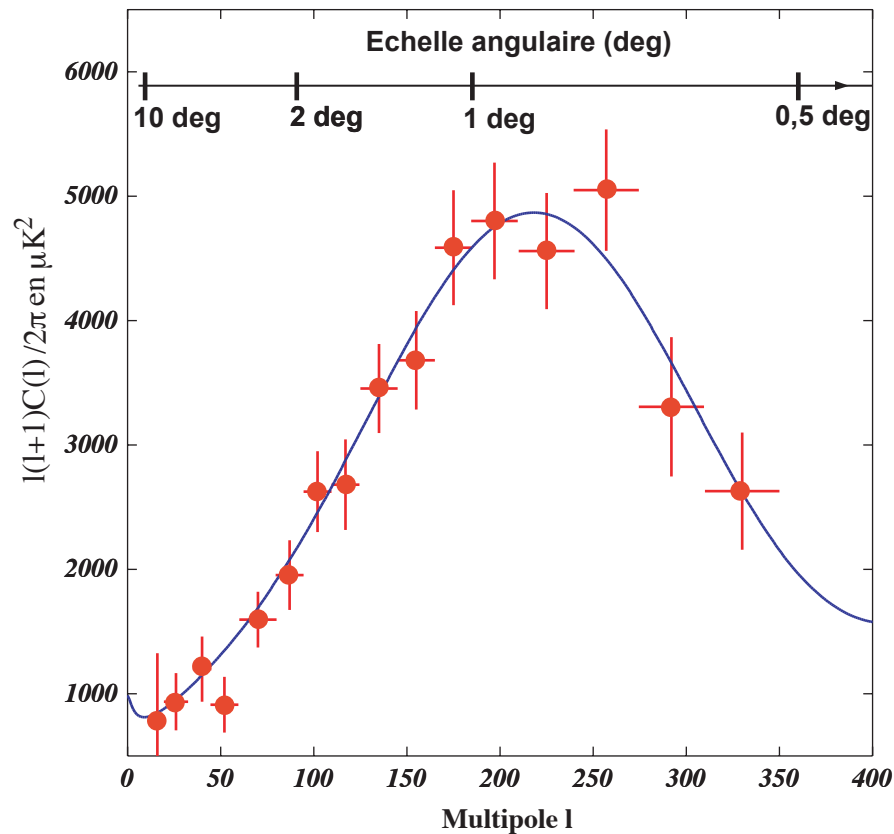


FIG. 9 – Spectre de puissance mesuré par Archeops [6]

## 6 Conclusions

L'interprétation des observations décrites ici, celles du fond diffus et des supernovae lointaines, complétées par les mesures du paramètre de Hubble  $H_0$  et d'autres observations cosmologiques provenant des grands relevés de galaxies par exemple, confirme de manière spectaculaire le modèle du Big Bang. Elles indiquent en outre que la densité totale de matière et d'énergie dans l'univers est proche de la densité critique, correspondant à un univers plat, de géométrie euclidienne.

La matière ordinaire (baryonique) ne représenterait que 4% environ de la densité totale d'énergie, plus des deux tiers de la densité ( $\sim 70\%$ ) étant sous une forme mystérieuse d'énergie qui se

<sup>7</sup>Archeops : <http://www.archeops.org>

comporte comme une constante cosmologique. Celle-ci agit comme une force gravitationnelle répulsive et serait à l'origine de l'accélération de l'expansion. Le quart restant ( $\sim 25\%$ ) serait composé d'une forme encore inconnue de matière, appelée matière noire froide. Les neutrinos et les photons, bien que très nombreux, ne représentent plus aujourd'hui qu'une toute petite fraction de la densité moyenne totale de l'Univers.

Malgré les grandes avancées dans la compréhension de l'Univers, de nombreuses questions sont encore sans réponse. Parmi celles-ci, élucider la nature de la matière sombre, notamment celle qui entoure notre Galaxie, déterminer les propriétés de l'énergie noire et en comprendre l'origine constituent certainement les grands défis de la cosmologie dans les années à venir.

## Références

- [1] James Rich, Fundamentals of Cosmology, Springer-Verlag (2001)
  - [2] Coll. EROS, Astronomy & Astrophysics, 400, 951-956 (2003)
  - [3] A. Eckart & R. Genzel, Nature 383, 415 (2002)
  - [4] A.G. Riess et al., The Astrophysical Journal, Volume 613, 189-199 (2004)
  - [5] D.N. Spergel et al., Astrophysical Journal Supp. Series, 148, 175-194 (2003)
  - [6] Coll. Archeops, Astronomy & Astrophysics, 399, L19-L23 (2003)
-